

カーリングの石はなぜ曲がるか

村田次郎

むらた じろう
立教大学理学部(素粒子・原子核、重力物理学)

オリンピック競技で人気のカーリングは、その名の通り投げた石の軌道が曲がるという特徴が目立つ。ところがこの現象は、これが科学的になぜかと最初に問われて以来、謎のままほぼ1世紀が過ぎた。満足な観測データがないままに議論が行われてきた状況を鑑み、私は精密観測を行うことにより、その主原因を特定できたと考えている。カーリング石が曲がる機構や運動の特徴、そしてこんなにも長く議論が続いてきた背景を紹介したい。

研究とはじめ

慣性の法則に従い、運動する物体は等速直進運動を行うのが自然の本来の姿であると物理学では考える。また、ボールが落下運動するのはそこに重力という余分な効果をはたらくからであり、机の上を滑らした箱がやがて止まるのは摩擦力がはたらくからであると考え。すると、進行方向が曲がる現象は、何かよほど特殊なことが起きているに違いない。野球の変化球がよい例で、これは周辺の空気の影響である。空気抵抗は動きが速くなって初めて目立ってくる効果で、歩いている時にはほとんど感じることはないだろう。

カーリング石が曲がる現象に対しても、何らかのメカニズムが既によくわかっていると思われるだろうが、これがなんと未解決問題どころか「世紀の謎」だったのだから驚きだ。本稿の結論を端的に言うと、カーリング石は底がザラザラしており、これが氷に引っかかって振り子のように振られて曲がるという、至極単純な理由であることがわかった、というものである¹。あまりにあっけないが、これを観測で実証するのは容易ではない。もっともらしい理屈はいくらでも考えつくこと

ができるが、もっともらしさや学問的権威ではなく実験データを説明できる理屈だけが生き残るのが自然科学の厳しい掟である。そこで、私はまずはカーリング石の動きをよく観察し、これを正確に記録してみることにした。全ての自然科学の基礎は観察なのである。

測定

スポーツ科学とは無縁だった私がカーリングの研究を始めたきっかけは、立教大学理学部の卒業研究の指導だ。カーリング石の曲がる理由が謎であること、これまでに提案されてきた仮説などは、この研究を行った当時4年生の平いくみさんがほとんど教えてくれた。謎の解決は難しいだろうけれど、まずは運動の様子を様々なセンサーでしっかり測ってみよう、というスタンスで初めてカーリング場を訪れたのが2019年の1月である。学生達が頼もしく様々な観測データを取っている間、暇を持て余した私は一人でカーリング石を投げて遊んでいた。競技的には非常識なほど遅く、かつ高速回転をかけていた。そして見た。石は「引っかかって『曲がって』いる」。

石が停止直前の数cmで大きく屈曲し回り込む現象は、競技者でなくともカーリングファンには周知の現象らしい。私が見たのはこの現象だった。その様子はまるで、水面下の岩に座礁して振られたボートの動きそのものであり、座礁した点を中心に全体が振られて回転する。例えば、左側で座礁すれば全体が左側へ振られる。つまり「曲がる」のである。肉眼でこれを観察した時点で、これがこの問題の核心部だな、と思った。問題は、これで人を説得できるかである。

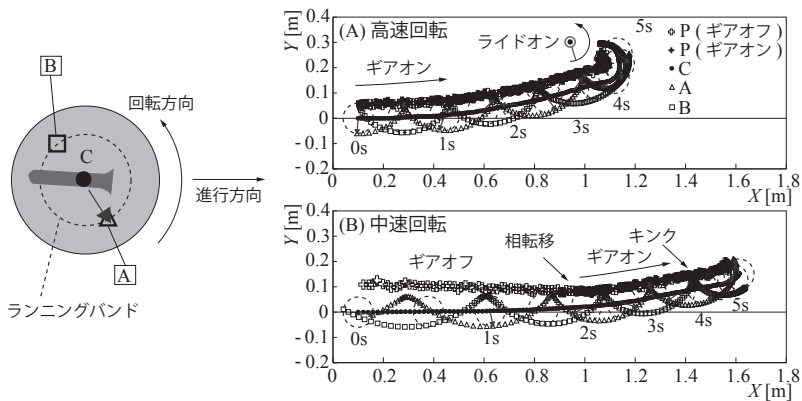


図1—石の軌跡の例(文献1より引用し、一部改変)

石に貼ったラベルA,Bと中心Cの位置を1/30秒毎にプロットしたもの。P点は図2を参照。(A)高速回転,(B)中速回転のいずれも、反時計回り回転で進行方向に対し左側に曲がっていることがわかる。

観察結果

まずは結果と結論を説明しよう。今回は、運動中の石の位置と向き、という幾何学的な情報だけを取得した。投げ上げたボールの運動の観測と同じであり、例えばボールの軌跡が放物線なのか(下向きの加速度が一定なのか)の検証は、物理学ではなく単純に数学・データ解析である。カーリング石がなぜ曲がるか、というこの研究の作業の90%はこの数学であり、残りのうち9%が変化の原因を整理する際の物理学、最後の1%が氷の性質である。この数学の部分こそが真の「観察」に相当する最重要ポイントである。ところが1%に過ぎない氷の性質ばかりに興味が集まって理解が進まなかったのが、解決が長引いた遠因ではないかと考えている。

さてその後、学生の研究は競技支援の工学的開発に移り、コロナ禍の影響もあって曲がる原理の研究は私が一人で軽井沢アイスパークで行うこととなった。コンパクトカメラを三脚に付けて真上から動画撮影し、私自身が石を投げる、という作業である。競技では30m近くも投げるが、ここでは曲がる様子を精度よく観測しやすいように2m程度の滑走距離のデータを多数取得した。この際、3次元を超える高次元空間を探索するための重力の実験に使用してきた画像処理技術を応用

した^{2,3}。複数パターンの速さ・回転速度で試行したが、初期条件を一定にする特別な制御装置は用いず人力で行った。初期条件は精密に測定できるためである。一般に、制御よりも測定の方が遥かに容易である。

強い旋回「ライドオン現象」

図1に石の軌跡の例を2つ示す。反時計回りの石を右向きに投げている。石の中心Cの軌跡と、回転角度がわかるように貼り付けた2枚のラベルA,Bの位置を1/30秒毎に示している。図1(A)中の「ライドオン」では停止直前に大きく左に回り込む現象が観測された。この「旋回運動」の中心はほとんど動いておらず、まさに目視で見られた「座礁」である。実際には岩ではなく氷山に石の左端が乗り上げており、この現象をライドオンと名付けた。カーリング場の氷面には1cm程度の大きさのペブルと呼ばれる氷の突起が多数、人為的に付けられている。このペブルに乗り上げて振り回されたように見えるのがライドオンである。

ライドオン現象は石の一点が氷に引っかかって全体が振り子のように振られる旋回運動が存在する明確な証拠である。その根拠は、旋回運動中にその回転支点が動かないことである。これは目視でもある程度わかるが、これをデータで示すため

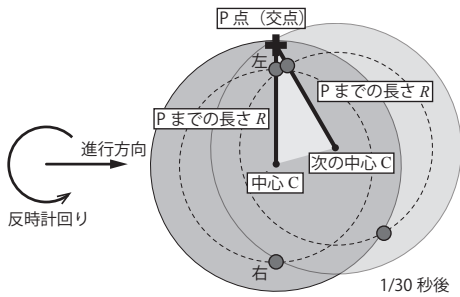


図2—旋回中心(P点)の定義

に「時間的に位置が動かない、石の上の点」を画像解析から算出した。これが図中のP点である。動画は毎秒30コマの静止画が連続したものだが、ここでは連続した2コマの画像を比較して、動いていない点を算出させた。多少複雑な幾何学の計算が必要で詳しい定義は文献1にあるが、図2に簡便な定義を示した。

期待通り、図1(A)のライドオンの旋廻中心と期待される場所にP点が集中しているのがわかる。まさに振り子のように、このP点を回転の支点とする旋廻運動の決定的な証拠である。多くの場合、反時計回りでは左曲がりのライドオンが観測される。右側ではなく左側で回転の支点が形成されやすい理由は、左側の進行速度がゼロになる条件が整うと、動摩擦力よりもずっと強い静止摩擦力がはたらくことから理解できる。

つまり、動いている右側には支点ができにくく、止まっている左側は引っかかりやすくなって左旋廻する。ただし、停止直前は右側もかなり低速になっており、ペブルの分布によっては右側に振れることも稀にある。左右どちらに振れるか、あるいは大きめのペブルや石の突起がそこになくてほとんど振れないか、偶然性に左右される現象ではある。競技に大きく影響する、厄介だがうまく扱えば有用な現象である。

この現象自身はカーリングの謎を最初に提起した1世紀前の論文⁴から存在が指摘はされていたが、主原因とは無関係な特殊な現象と考えられて近年はほとんど無視されていたようである。本研究ではむしろこれを代表的な現象と捉えて、一般化する方向で考察を進めた。

「ギアオン・ギアオフ現象」

さてライドオン以前に目を移すと、確かに「反時計回りで左に曲がる」カーリングの特徴的な軌跡が見える。慣性の法則に従って直進しそうな所を曲がるのであるから、何か特別な理由が必要である。この程度の速度では空気抵抗はほとんど効かないことは明らかであるので、水面の摩擦に原因を求めたくなる。石の進行方向の前側は、反時計回りなら左側に移動しているから、摩擦力は右側にはたらく。後ろ側では逆に左側に摩擦力がはたらく。普通に考えると、前側は絶えず氷との衝突に晒されており、後ろ側は逆に衝突は少ないだろう。従って、もし摩擦が前後で大きさの違いがあるとすれば前の方が大きいだろうと思う。

ところが、これだと「反時計回りで右側」に曲がることになってしまい、現実とは反対になる。かなり回転数を上げなければ観測しにくいのだが、机の上のコップなどで試せば実際右側に曲がるため、この「物理的な直観」に反して逆向きに曲がるのが、カーリングが謎と言われる所以である。

さて図1(A)でギアオンと名付けられた領域を見てみても、中心の軌道が曲がっているのは確かだが、ライドオンとは違いその様子だけからは原因がわからない。旋廻とは違う、別の原因で滑らかに横ずれしているのかもしれない。そこで再びラベルの軌跡に注目すると、進行方向に対して左右真横方向に位置した時のラベルの速度がわかる。左側ではラベルが動いていないことを示す、横方向に尖った形状(図1(B)の「キンク」)をしている。つまり左側の速度はゼロになっているのである。この状況は、左側を中心とした振り子状の回転に他ならない。これは地面とタイヤの回転運動を考えればわかりやすい。タイヤは地面に接する部分では速度がゼロであるが、全体は前方に進むのである。歯車が噛み合った状態に似ているので、これをギアオンと名付けてある。通常の振り子と違うのは形状が丸いため、歯車のように支点が前に移動していく点である。

旋回の証拠はP点の分布からわかる。ギアオ

ン状態のP点は、全て左側にあり、中心からほぼ一定の距離を保って分布している。あまり知られていないがカーリング石の底面は平らな円ではなく、幅が1 cm程度のドーナツ状の部分(ランニングバンドと呼ばれる)だけで氷と接している。したがって実際に氷と石の底が噛み合うならば、その位置はこのランニングバンド上になければならない。P点は、例外なくまさにこの位置に分布していることがわかった。一つのペブルを固定支点として旋廻するライドオンとは違い、歯車が歯を切り替えながら回転するように、ギアオンでは支点を進行方向に切り替えながら進んでいるものと推測される。おそらくペブルを次々に乗り替えていると想像するのが簡単だが、詳しい様子はわかっていない。

ギアオンの成立条件は、左側の速度がゼロであることである。これは、進行速度と自転速度がそこで相殺する状況である。競技の際には自転速度がこれより低い場合が一般的であり、投げてすぐの早い時点でギアオン状態が実現することはむしろ例外的だろう。左側の速度がゼロにならず前方に進む場合は、歯車が噛み合わず前方にずれてしまうことが考えられる。左側で氷を爪で引っ掻きながら進む状況である。

この場合、支点が前方にずれた分だけ幾何学的にはP点が旋廻の支点の位置より遠方にずれる効果となる。歯車が外れて「滑っているタイヤ」の状態であるギアオフでは、ランニングバンド位置よりも遠い場所にP点が分布するはずであり、図1(B)では実際、その様子が見られている。時間経過とともに摩擦の強い左側の速度がゼロに近づくに従ってP点がランニングバンド位置に収束して連続的にギアオンに移行する傾向が、試行した全てのショットで確認された。このことから、全く異なるメカニズムを導入せずにギアオフでの曲がりを最も自然に説明するのは「ずれる旋廻」であると思われる。左側の速度がゼロになってギアオンに移行する現象を「相転移」と名付けてある。

● 曲がる理由

石の左右では対地速度が異なることから、摩擦力の大きさには違いがある。氷と石の摩擦では動摩擦係数が実際には一定ではなく、遅いほど摩擦が強いことは昔からよく知られていたし、本研究でも直接測定した(図3)。

また、ギアオフでは回転速度がなかなか減衰しない現象が知られているが、これは直進エネルギーが回転を助けている効果であることが判明した¹。図4(A)の模型のように左右で大きさの違う、後ろ向きの摩擦力は自転の回転力として作用するからであり、摩擦力の左右非対称性の何よりの証拠でもある。

遅い側の摩擦が強いことから、その向きへ曲がるだろうというのが記念碑的な1世紀前の論文⁴で問題提起と同時に提案された左右非対称説である(図4(A))。ところが、これにはすぐに反対意見が出た⁵。そしてなぜかはわからないが、机の上のコップとは違う何らかの氷の特殊な性質によって、前ではなく後ろの摩擦の方が強いせいだ、という説⁶が主流となった。

この前後非対称説は定説としての地位を得られ

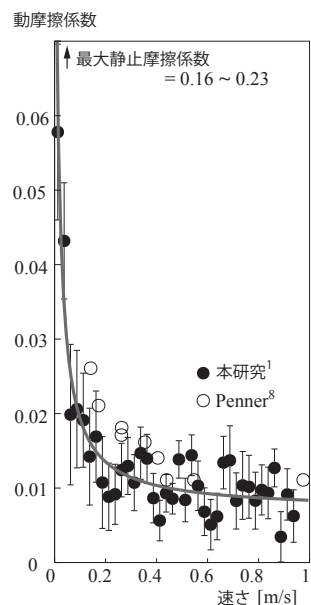


図3—動摩擦係数の実測結果(文献1より引用し、一部改変)

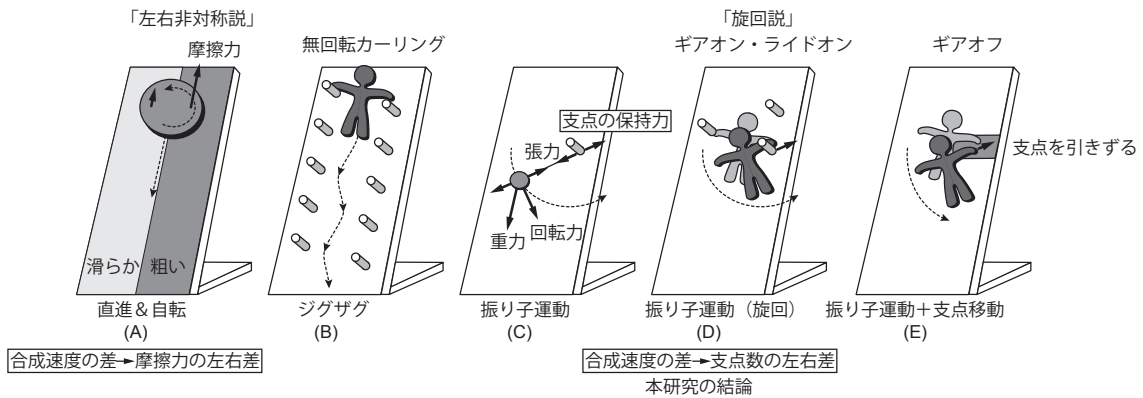


図4—粗い斜面の摩擦と「カタカタ人形」

ないまま、本研究の一部でもある旋廻説⁷などの諸説登場後も有力な一説として今日に至っている。図4(A)の模型の通り左右の摩擦力は進行方向に対して真後ろの向きであって、確かに左右方向の成分をもたないことがこの説が有力な理由である^{5,8}。こうして、消去法的な代替案である前後非対称性を生み出す候補を求めて氷の特殊な性質がさかんに研究されることとなった。直観に反して後ろ側で摩擦が強いならば学術的にも新規性があるって興味深いからでもあるだろう。

● 摩擦力とは

ところで力学で学習する摩擦力は、一様重力場中の重力のようにあたかも連続的な力のごとく思われているし、実際にそのような取り扱いをする。現実の摩擦現象は物体間の粒々(離散的)な相互作用を寄せ集めたもので、これが無限にある場合の極限が連続的な摩擦力という概念である。この離散性が消えない現実的な場合、例えば粗い斜面を滑り落ちる物体はカタカタ人形のように常にガタガタするのである(図4(B))。カーリングの場合、離散的な相互作用は石に固定された、孤立した力点が発生していることを意味する。

ミクロな素過程から見ればマクロな摩擦力は観察者の主観にもとづく情報削減を目的とした粗視化操作の産物であって、客観的には幻想でしかない。これは分子からなる気体の圧力・温度やエントロピーなど、「観測・解釈されて初めて意味を

もつ」全ての主観的な統計量の取り扱いに際して普遍的に当てはまる注意点である。

天井や床など、非常に重い物体に固定された力点が回転の支点となる状況の代表格は振り子である(摩擦の素過程を自由粒子との2体散乱と捉える際、質量が大きな衝突相手との間に引力が残る場合に相当)。振り子には重力が真下にはたらき、横方向の成分が元々は存在しない。しかし、振り子は横に振れる。これは「謎」ではないのか。

これは糸の張力が重力の糸の方向の成分を相殺した結果、糸に垂直な成分が抽出されるからである(図4(C))。「摩擦力の取り扱い」では禁止される、連続性を破る空間の特別な点、つまり張力を保持できる支点の存在によって、たとえ外力が下方方向であっても横方向の動きは発生する。カーリングも状況は振り子と同じであり、例えば石の突起が氷に食い込んで孤立した支点が形成されることで、前方方向への慣性力により振り子同様に支点側へ振られるのである(図4(D))。電車で手すりを片手で掴んで立っている時に急ブレーキがかかると、前方に慣性力がかかって手すりを掴んでいる側に振られる状態を思い浮かべればよい。「振り子は横に振れないはず」と同じ論理で、左右非対称説は1世紀も否定されてきたとも考えられる。なお、ずれずに完全に固定された支点の場合は慣性力で考えるより、コマと同様に回転方向の慣性の法則(角運動量の保存)で考える方が遥かに単純である。

支点が固定されたライドオン・ギアオン(図4(D))でも支点が引きずられるギアオフ(図4(E))でも、支点発生の左右非対称性は摩擦の強弱から来ている。遅いほど摩擦、つまり元々は離散的であった相互作用の生じる確率が大きいからである。そしてこの支点を中心として振り子運動が起こる。カーリングの自転は石を曲げるエネルギー源ではなく、主として旋廻支点を遅い側に選択的に多く発生させる契機に過ぎない。ライドオン現象など、非常に回転が速く直進速度が遅い特殊な場合を除いて通常は間接的な役割に留まると考える。従って、選手がよく知っているように、曲がり具合は回転速度に比例はしない。

支点が左右非対称に形成され振り子のように振られて曲がる、というこの研究の結論の各構成要素は以前より仮説としてはあったもので⁹、本研究では精密なデータでその証拠を押さえ、力学的な解釈を補って組み合わせたものである。机上の空論ではなくデータを尊重する流れは近年現れ始めており、特に石の底の粗さが決定的であることはわかっていた¹⁰。これは支点回転の前提となる重要な知見で、論文^{9, 10}と本研究¹のいずれも我が国発のものであることは特記すべきだろう。

「世紀の謎」となった理由

カーリングの謎の解決が長引いて世紀の謎となった大きな理由は、論文⁴の左右非対称説を「摩擦力の法則」を単純に適用して候補から排除したこと⁵、それが疑われなかったこと⁹にあると思われる。摩擦の効果が速度方向の後ろ向きを向くのは、横方向のガタガタの効果が均されて消える理想的な連続極限だけであり、「摩擦力の法則」は無条件に適用するのは誤りである。「摩擦力」は左右に動く効果が平均操作で結果的に相殺されることが前提であり、人為的に前後方向の効果だけを取り出している取り扱いである。これを出発点に据える限り、左右非対称な運動は決して出てこないのは当然である。

カーリングは「『摩擦』の左右非対称性」が原因で曲がると言ってよいが、これを「『摩擦力』

の左右非対称性」という枠組みにはめ込んだことがバイアスとなって迷走した、左右非対称説にとっては不名誉な誤解が続いた98年間だったと考える。既知の枠組みを原理に据えその中の特殊例を追い求めるのではなく、摩擦というマクロな現象の捉え方自身を普遍化する方向で解決された問題だと言ってよいだろう。

カーリングの謎と、なぜそれが謎となったか、それが如何に解決に向かいそうか、という物語は驚きと教訓に満ちている。カーリング石の運動はどうしても曲がることだけに注目がいきがちだが、非常に多彩な動きをすることも本測定で判明した。特にスウィーピングに関して今後の競技へのフィードバック等の展開が楽しみである。

文献

- 1—J. Murata: Sci. Rep., **12**, 15047(2022)
- 2—村田次郎:「余剰次元」と逆二乗則の破れ。講談社ブルーバックス(2011)
- 3—K. Ninomiya et al.: Class. Quant. Grav., **34**, 185005(2017)
- 4—E. L. Harrington: R. Soc. Can. Proc. Trans., **18**, 247(1924)
- 5—W. H. Macaulay & G. E. Smith: Nature, **127**, 60(1931)
- 6—G. Walker: Nature, **140**, 567(1937)
- 7—M. R. A. Shegelski & E. Lozowski: Can. J. Phys., **94**, 1305(2016)
- 8—A. R. Penner: Am. J. Phys., **69**, 332(2001)
- 9—対馬勝年: 日本雪氷学会誌, **73**, 165(2011)
- 10—T. Kameda et al.: Sci. Rep., **10**, 20637(2020)

村田次郎 むらた じろう

3次元を超える高次元空間を探索する重力実験や、空間と時間の対称性を検証する加速器実験を主軸に、学生と一緒に身近な物理の検証も楽しんでいる。著書に「『余剰次元』と逆二乗則の破れ」(講談社ブルーバックス)など。カーリング競技は実は一度もやったことがない。